УДК 550.47:631.963:631.529

Т.Ю. БЕДЕРНІЧЕК

Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка НАН України
Україна, 01014 м. Київ, вул. Тімірязєвська, 1

БІОЛОГІЧНА СЕКВЕСТРАЦІЯ КАРБОНУ: ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІНТРОДУКОВАНИХ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН (НА ПРИКЛАДІ *QUERCUS RUBRA* L.)

Одним із актуальних завдань сучасної біогеохімії є зменшення концентрації діоксиду карбону в приземних шарах атмосфери. Найдоступнішим способом, який дає змогу ефективно вилучати з тропосфери діоксид карбону, є біологічна секвестрація Карбону. Традиційно підвищення ефективності секвестрації досягають збільшенням продуктивності фітоценозу. Розглянуто зворотний підхід — досягнення цієї самої мети в результаті зменшення ефективності катаболічного блоку наземних екосистем. Управління швидкістю деструкції фітодетриту в лісах та агролісах рекомендують здійснювати шляхом порушення нормального функціонування одного чи декількох рівнів у детритних трофічних ланцюгах та мережах. Запропоновано схему трофічних перетворень органічної речовини у біогеоценозі з виділенням шести основних блоків, які істотно відрізняються за характерним часом (mean residence time): біомаса, некромаса, копромаса, детрит, органічна речовина ґрунту, рідкі продукти життєдіяльності. На прикладі опаду дуба червоного (Quercus rubra L.) проаналізовано причини значно повільнішого розкладу фітомаси, некромаси та детриту порівняно з автохтонними видами у помірному кліматичному поясі (Східна Європа). Обґрунтовано доцільність використання інтродукованих деревних рослин для сповільнення деструкції органічної речовини у біогеоценозі.

Ключові слова: резервуар Карбону, детрит, органічна речовина ґрунту, фітомаса, катаболізм, *Quercus rubra*, інтродуковані деревні рослини.

Нераціональне ведення сільського і лісового господарства (зокрема знеліснення) та інтенсивне спалення викопного палива спричиняють поступове збільшення концентрації одного із основних парникових газів — діоксиду карбону (CO_2) в атмосфері. З початку ери індустріалізації вона збільшилася на 43 % і продовжує зростати [3,12].

Виробництво всіх товарів та послуг пов'язане із надходженням в атмосферу додаткової кількості CO_2. Ефективними способами протидії цьому небажаному процесу є секвестрація Карбону — вилучення CO_2 з атмосфери (газової фази). Розрізняють геологічну, хімічну та біологічну секвестрацію Карбону. Остання є найменш вивченою і, на нашу думку, найперспективнішою для застосування в умовах помірного клімату [1].

Основним недоліком біологічної секвестрації Карбону порівняно із геологічною та хімічною є її короткостроковість — вилучення CO_2 з атмосфери забезпечується лише впродовж незначного періоду часу: від декількох днів до декількох років. Доцільність проведення секвестрації Карбону на такий нетривалий час пояснюється тим, що зазвичай її використовують як проміжну ланку в ширших процесах, наприклад, при вирощуванні сільськогосподарських культур чи водоростей, часто — як ланку кормовиробництва [8].

Мета роботи — обґрунтувати можливість і доцільність проведення біологічної секвестрації Карбону з використанням інтродукованих деревних видів рослин на прикладі *Quercus rubra* L.

Основна ідея полягає в управлінні швидкістю деструкції фітодетриту в лісах та агролісах шляхом порушення однієї чи декількох ланок трофічного «конвеєра» у катаболічному блоці екосистеми.

Фізіологія наземних екосистем

Упродовж останніх років у багатьох біологічних дисциплінах простежується стійка тенден-

© Т.Ю. БЕДЕРНІЧЕК, 2019

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

ція переходу від вивчення структурних властивостей об'єктів до дослідження їх функцій [8]. Така тенденція притаманна й екології. У більшості досліджень вивчають не структуру угруповань, популяцій чи екосистем, а функціональні зміни, обмінні процеси тощо [4]. Виникла нова дисципліна, яку західні вчені визначають як *фізіологію екосистем*, а російські дослідники — як *функціональну екологію* [5].

У функціональному плані на рівні екосистеми виділяють два основних блоки — анаболічний (продуценти) та катаболічний (консументи і редуценти). Вони стехіометрично збалансовані за рахунок різнонаправлених процесів анаболізму (синтезу органічної речовини з неорганічних сполук) та катаболізму (мінералізації органічної речовини до неорганічних сполук). Незначна (0,5—1,0 %) [5] розбалансованість цих процесів дає підставу виділити на екосистемному рівні ще один процес — некроболізм — накопичення нерозкладених органічних сполук (гуміфікація).

Важливим завданням нашого дослідження є пошук шляхів управління інтенсивністю процесів анаболізму і катаболізму та їх співвідношенням. Фактично, що більшою буде розбалансованість цих процесів (за умови, що швидкість анаболізму перевищуватиме таку катаболізму), то ефективнішою буде секвестрація Карбону. Двома очевидними шляхами, які дають змогу це зробити є: 1) збільшення швидкості накопичення органічної речовини у системі, чого досягають, наприклад, упровадженням нових високопродуктивних культур, 2) сповільнення темпу деструкції органічних сполук — інгібування процесів мінералізації (нітрифікації).

Трансформація детриту в лісових екосистемах

У процесі трансформації детриту принциповим моментом є структурне розділення анаболічного та катаболічного блоків у біогеоценозі. Початок процесу деструкції фітомаси у природних екосистемах не завжди вдається встановити однозначно. Традиційно [14] вважають, що фітодетрит є синонімом лісової підстилки і з того моменту, коли різні фракції фітомаси потрапляють на поверхню грунту,

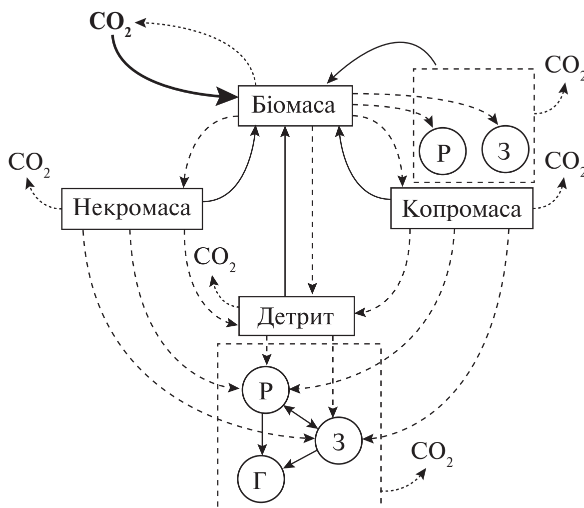


Рис. 1. Субстрат-трофічні перетворення органічної речовини у біогеоценозі: Р — розчинені органічні речовини; З — завислі органічні речовини; Г — гумусові речовини; суцільними лініями позначено процеси синтезу та гуміфікації, пунктиром — деструкції

Fig 1. Substrate-trophic transformation of organic matter in the terrestrial ecosystem: Р — dissolved organic matter; З — suspended organic matter; Г — humic substances; Solid lines mark synthesis and humification, dotted lines mark decomposition

починається детритний (катаболічний) етап їх перетворень. Проте той же автор зазначає, що «ще на стадії опадання листя та хвоя піддаються інтенсивному заселенню специфічною мікрофлорою, в якій переважають дріжджоподібні види типу *Pullularia pullulans*, які засвоюють переважно пектини» [14, с. 97], з огляду на це початок детритного ланцюга перетворень доцільно простежувати ще від стадії біомаси (рис. 1), оскільки від її стану безпосередньо залежить кількісний та якісний склад органічних сполук, котрі надходять прижиттєво та посмертно у біотоп. Наприклад, ураження рослин фітовірусами чи іншими патогенами [13] істотно зменшує тривалість їх життя і впливає не лише на якісний склад органічних сполук у різних фракціях фітомаси, а і на швидкість відмирання рослин та їх частин і, відповідно, наповнення пулу фітодетриту.

У запропонованій нами схемі виділено шість основних структурних блоків, кожен з яких від-

повідає певному стану або етапу трансформації органічної речовини ґрунту в біогеоценозі: біомаса, некромаса, копромаса, рідкі продукти життєдіяльності, детрит і органічна речовина ґрунту.

Блок «біомаса». Центральним компонентом біогеоценозу є блок «біомаса», який є гетерогенним і складається з мас продуцентів, консументів та редуцентів. Він забезпечує декілька основних функцій: фотосинтез, деструкцію органічної речовини та обмін між основними блоками. Наприклад, некромаса не може перетворитися безпосередньо на копромасу чи навпаки — ці процеси відбуваються лише через блок «біомаса». Значна частина фітомаси споживається травоїдними тваринами і, відповідно, перетворюється у подальшому на копромасу або рідкі продукти метаболізму чи споживається консументами різних порядків і таким чином включається у трофічні мережі різної довжини та складності [11]. Унаслідок відмирання організмів чи їх частин біомаса перетворюється на некромасу (мортмасу).

Блок «некромаса». З некромаси внаслідок автолізу та механічного подрібнення вивільняється значна кількість розчинених органічних сполук (за даними [4], до 20 % за масою), які вимиваються у детрит або потрапляють безпосередньо до органічної речовини ґрунту. Водночас більшість некромаси у біогеоценозі складається із відмерлих організмів та частин автотрофів і тому містить нерозчинні (у воді) органічні речовини: целюлозу, лігнін, лігноцелюлозу тощо. Лише частина із них потрапляє безпосередньо до органічної речовини ґрунту у вигляді завислих органічних речовин (*З*) — здебільшого фрагментів клітинних стінок і тканин продуцентів. Механічне подрібнення та ферментація «некромаси» за участі екзоферментів спричиняють перетворення значної її частини на фітодетрит. Проте більшість «некромаси» не досягає стадії детриту, а споживається численними сапротрофами і, відповідно, входить до біомаси консументів чи редуцентів, а згодом у вигляді копромаси чи рідких продуктів життєдіяльності потрапляє у блок «детрит» або безпосередньо до «органічної речовини ґрунту».

Блок «копромаса». На відміну від некромаси та продуктів її розкладу копромаса та численні фізіологічні рідини належать до прижиттєвих продуктів метаболізму. Копромаса насамперед є важливим субстратом для облігатних та часткових копрофагів, до яких належить широкий спектр видів — від ссавців до грибів та гетеротрофних протист. Вони забезпечують інтенсивний обмін між блоками «біомаса» та «копромаса» шляхом перетворення продуктів життєдіяльності тварин на біомасу консументів і редуцентів. Фактично, ці процеси забезпечують трофічне подрібнення складних важкогідролізованих високомолекулярних сполук, зменшуючи рівень енергії активації субстрату для наступних трофічних ланок. Таким чином, органічна речовина, яка надходить до блоку «детрит» чи «органічна речовина ґрунту» і вже зазнала декілька стадій трансформації (конверсії), стає доступною широкому спектру мікроорганізмів, оскільки її споживання є термодинамічно вигідним.

Блок «детрит» складається з подрібнених, ферментованих і частково гумусованих компонентів некромаси та копромаси. Через значну просторову і хімічну неоднорідність він забезпечує високе різноманіття субстратів і, як наслідок, — біотичне різноманіття. На думку Ю.М. Чорнобая [14], фітодетрит можна вважати синонімом підстилки, а шари опаду (*L*), ферментації (*F*) та гуміфікації (*H*) відповідають стадіям трансформації органічної речовини. Трофічне подрібнення органічної речовини у складі цього блоку є найінтенсивнішим у межах біогеоценозу і передбачає інтенсивні субстрат-трофічні взаємодії різних фізіологічних груп організмів. Особливістю блоку є поширений синергізм. Наприклад, екзоферменти різних бактерій часто мають кооперативний вплив [3]. Крім того, трофічні мережі у цьому блоці функціонують в умовах надлишку субстрату, який не можуть засвоїти, тому значна його частина (до 50 %) [14] вимивається у ґрунт у вигляді розчинених (*Р*) або завислих (*З*) органічних речовин.

Блок «органічна речовина ґрунту» є більш гомогенним порівняно із детритом, що пояснюється значно вужчим діапазоном розмірів

структурних частинок. Якщо у блоці «детрит» можуть міститися фрагменти некромаси розміром до декількох сантиметрів, а іноді — до декількох десятків сантиметрів (плоди, гілки, кістки тощо), то органічна речовина ґрунту — це здебільшого значно менші фрагменти, котрі не перевищують 2,5 мм у діаметрі [20]. На думку А. Керженцева, не лише шари підстилки, а і ґрунтові генетичні горизонти є функцією органічної речовини в біогеоценозі та «різними поєднаннями початкових, проміжних і кінцевих продуктів катаболізму екосистеми, який поєднує процеси мінералізації та гуміфікації відмерлої фітомаси» [5, с. 35]. Унаслідок розбалансованості процесів анаболізму та катаболізму в цьому блоці відбувається процес гуміфікації — накопичення висококонденсованих органічних сполук, які вирізняються значною енергоємністю [9]. Принциповою відмінністю цього блоку від біо-, некро- та копромаси є значно триваліше перебування органічної речовини в його складі — від декількох місяців до десятків тисяч років [16], тоді як тривалість перебування органічної речовини у блоках «детрит», «некромаса» чи «копромаса» не перевищує декількох вегетаційних періодів і лише у фітомасі деревних рослин Карбон може зберігатися значно довше — сотні, а інколи тисячі років.

Окремо виділяємо блок **«рідкі продукти життєдіяльності»**, до складу якого входять сеча та інші рідкі виділення тварин, медвяна роса та падь, змиви з поверхні листя, хвої та кори, камеді, виділення рослин у відповідь на напади комах [2]. Незважаючи на незначну частку цих речовин в екосистемному циклі Карбону, більшості з них притаманна дуже висока фізіологічна і зокрема алелопатична активність. Тому, якщо при побудові структурних моделей біогеоценозів ними можна знехтувати, то у функціональних моделях ці компоненти обов'язково слід ураховувати.

Детальний розгляд субстрат-трофічних перетворень органічної речовини у біогеоценозі з виділенням основних блоків (пулів) та процесів трансформації (потоків) є необхідним для управління біологічною секвестрацією Карбону на біогеоценотичному рівні. Параметризацію циклу Карбону в лісових екосистемах зручно проводити за середньою тривалістю перебування або «життя» фракції органічної речовини у межах конкретного блоку (пулу).

Mean residence time

В англомовній літературі для оцінки середнього часу перебування або «життя» елементу, сполуки чи фракції у заданих умовах (топічних, термодинамічних, біотичних тощо) застосовують поняття *mean residence time* (MRT). В українській та російській літературі аналогом цього поняття є «характерний час» [1]. У цій статті ми вживаємо їх як синоніми. Характерний час сполуки чи фракції залежить від комплексу чинників, основними з яких є хімічний склад та гідротермічні умови. Останні мають визначальний вплив на дихальну активність ґрунту, яка може бути досить високою навіть в умовах дефіциту субстрату і навпаки [10].

Кожен із описаних структурно-функціональних блоків біогеоценозу має свій характерний час. Проте через значну неоднорідність блоків у його складі виділяють різні функціональні пули, тобто такі сукупності фракцій, які однаково реагують на зміни параметрів середовища (температура, тиск, вологість тощо). Зокрема у блоці «органічна речовина ґрунту» (рис. 2) традиційно виділяють три основних функціональних пули: активний, повільний (стабільний), пасивний (інертний) [6].

За А.М. Кузнецовим [7], характерний час активного пулу не перевищує 3 роки, повільного — становить 15—20 років, пасивного (інертного) — може перевищувати тисячі та десятки тисяч років. Більшість деструктивних та інших гетеротрофних процесів у кожному із блоків потребує додаткових дотацій енергії, яку організми отримують з енергії хімічних зв'язків унаслідок розкладу органічної речовини, і *супроводжується емісією CO_2 в атмосферу* (див. рис. 1 та 2).

Ефективна стратегія біологічної секвестрації Карбону має передбачати мінімальну кількість трофічних перетворень органічної речовини у біогеоценозі, а також низьку інтенсивність

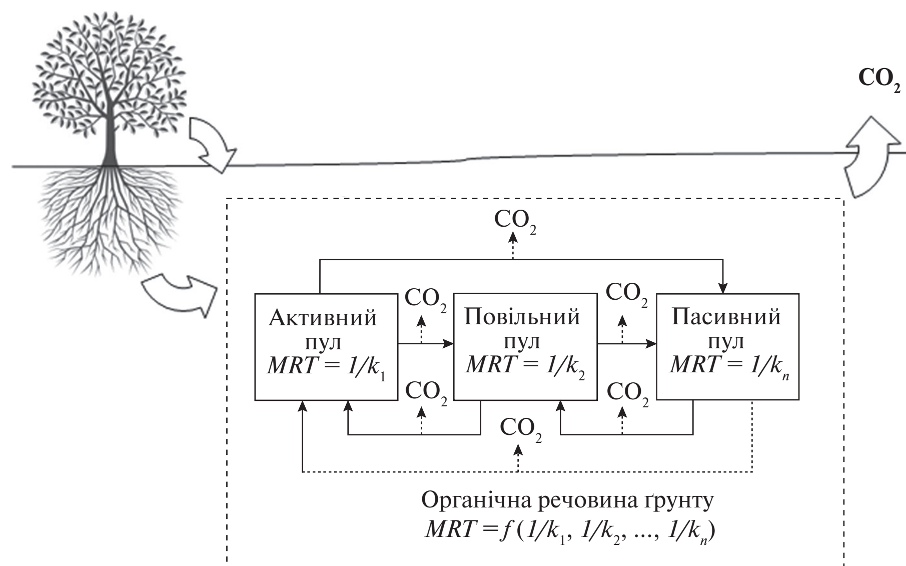


Рис. 2. Схема трансформації органічної речовини у ґрунті [1]: *MRT* — характерний час; *k* — константа швидкості мінералізації ($1/k \rightarrow t_{50\%}$)

Fig 2. Scheme of organic matter transformation in soil: *MRT* — mean residence time; *k* — decomposition rate constant ($1/k \rightarrow t_{50\%}$) [1]

обміну між функціональними пулами у межах кожного з блоків.

Інтродуценти і керована деструкція

Основна ідея біологічної секвестрації Карбону полягає у збільшенні різниці між швидкостями синтезу біомаси та її деструкції. Традиційно акцент роблять саме на збільшенні синтезу. З цією метою використовують високопродуктивні сорти сільськогосподарських культур і деревних рослин, зокрема генетично-модифікованих рослин [12]. Значно менше уваги приділяють управлінню швидкостями деструкції органіки. Переважно з цією метою застосовують технології виробництва біовугілля [15], які дають змогу або переводити органічну речовину з блоку «біомаса» з коротким MRT до стабільного пулу органічної речовини, в якому Карбон депонується впродовж сотні років.

Основним недоліком виробництва біовугілля та подібних процесів є необхідність працювати безпосередньо із великими об'ємами органічної речовини в одному чи декількох блоках. Наприклад, у разі виробництва біовугілля із сидератів зелену масу необхідно скосити, гомогенізувати, обвуглити, повторно гомогенізувати і внести у ґрунт, що потребує значних енергетичних затрат. Через це прямий вплив на структурні компоненти (блоки) біогеоценозів у природі трапляється рідко і пов'язаний переважно зі стихійними явищами (вітровали, повені, сходження лавин тощо), епіфітотіями та епізоотіями [26, 29], знелісненням, конверсією угідь тощо. У природних екосистемах «управління» здійснюється шляхом впливу не на структурні блоки (біомаса, некромаса, копромаса, детрит, органічна речовина ґрунту), а на вхідні та вихідні потоки, які забезпечують їх функціонування. Ми пропонуємо поєднати два способи впливу для посилення ефективності біологічної секвестрації Карбону. З цією метою пропонуємо використовувати інтродуковані деревні рослини, зокрема дуб червоний *Quercus rubra* L.

Такий вибір пояснюється істотним скороченням трофічних ланцюгів та мереж, оскільки фітомасу інтродуцентів споживає значно менше консументів, а її рештки використовує значно менше деструкторів. Це твердження є

справедливим для багатьох інтродукованих чи акліматизованих видів рослин, які часто перебувають у значно вигідніших умовах порівнянно із автохтонними видами. Розглянемо це на прикладі одного із найпоширеніших у Європі інтродуцентів — *Quercus rubra*. Проаналізувавши понад 100 місцезростань цього виду в Польщі, D. Chmura [17] дійшов висновку, що він негативно впливає на видове багатство лісових екосистем, а тривале вирощування виду призводить до істотного спрощення видової структури трав'яного ярусу, підросту та підліску. E. Riepšas та L. Straigytė (2008) [27] провели подібне дослідження у Литві. Дослідивши 79 місцезростань *Q. rubra*, вони встановили, що його поширення спричинило зникнення у регіоні дослідження 11 неморальних трав'яних рослин. Крім того, було з'ясовано, що на однаковому ґрунті під різними видами дуба (звичайного та червоного) істотно відрізняється активність деструкторів. У ґрунті під *Q. rubra* виявили на 34 % менше мікроміцетів, на 20 % — целюлозодеструкторів та на 5 % — амоніфікаторів порівняно із ґрунтом із-під *Q. robur* L.

У корінних дібровах, де є весь необхідний комплекс організмів-деструкторів, розклад опаду відбувається значно швидше, ніж в умовах інтродукції (таблиця). За 12 міс у природних лісах за участю *Q. rubra* маса опаду зменшилась на 41—47 % [23]. Темпи розкладу опаду в європейських лісах були значно повільнішими. Дослідження 28 місцезростань *Q. rubra* в межах західної та центральної Литви [28] виявило, що впродовж 12 міс розкладається 30—31 % опаду. За даними цих авторів, лише через 24 міс маса опаду досягає 58 % від вихідної, тобто в умовах інтродукції листя *Q. rubra* розкладається вдвічі повільніше.

Ґрунтова мезофауна, яка є важливим чинником механічного і трофічного подрібнення опаду, віддає перевагу місцевим, а не інтродукованим видам [11]. За даними [21], швидкість розкладу листя дуба прямо залежить від видового багатства мікроартопод, котрі беруть участь у деструкції субстрату. В умовах інтродукції відсутні не лише окремі види, а цілі функціональні групи деструкторів. З огляду на це темпи трофічного подрібнення листя *Q. rubra* є значно нижчими, ніж у межах природного ареалу поширення.

Вища порівняно з автохтонними породами стійкість листя *Q. rubra* і триваліший період його розкладу зумовлені, крім низького трофічного значення, специфічними хімічними та фізичними властивостями. Порівнюючи властивості опаду інтродукованих та місцевих (Східна Європа) деревних рослин, D. Dobrylovska [18] встановила, що опад *Q. rubra* розкладається у 8 разів повільніше, ніж *Tilia cordata* (рис. 3, *a*). Повний розклад опаду ***Q. rubra*** триває до 5 років, тоді як 95 % опаду *Tilia cordata* у більшості випадків повністю втрачає анатомічну структуру впродовж перших 6 міс. Автор пояснює цей феномен значно нижчою (у 5 разів) концентрацію лабільних водорозчинних сполук в опаді *Q. rubra* (рис. 3, *b*), а також його низькою здатністю сорбувати та утримувати вологу (більш ніж удвічі нижчою порівняно з такою у *Tilia cordata*).

Розклад опаду *Q. rubra* у корінних дібровах та в умовах інтродукції

Decomposition of *Q. rubra* litter in the natural and man-made oak forests

Джерело	Умови	Тривалість, міс	Частка залишку, %
Holdsworth et al. (2008)	Ліс Чіппева, США	15	55
Pouyat & Carreiro (2003)	Літчфілдський ліс, США	12	59
Frost & Hunter (2008)	Мезокосми, США	12	53
Kim et al. (1996)	Роскоммонський ліс, США	12	58
Straigyte & Zalkauskas (2012)	28 насаджень *Q. rubra*, Литва	12	69
Jonczak et al (2015)	Заплавні діброви, Польща	12	62
Straigyte & Zalkauskas (2012)	28 насаджень *Q. rubra*, Литва	24	58

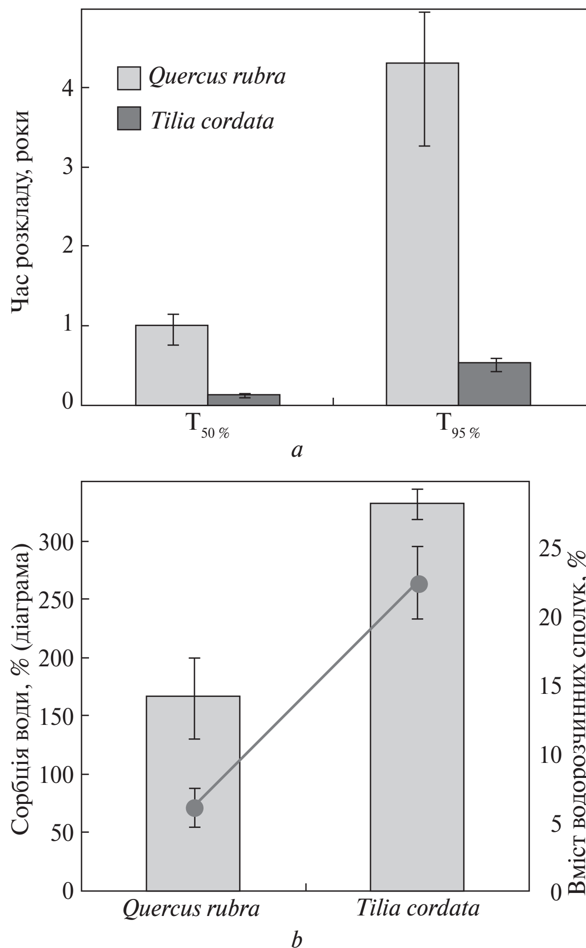


Рис. 3. Час розкладу опаду *Quercus rubra* та *Tilia cordata* (*a*); вміст водорозчинних сполук і сорбційна здатність опаду цих рослин (*b*) [18]

Fig. 3. Decomposition of *Quercus rubra* and *Tilia cordata* litter (*a*); content of water-soluble compounds and sorption ability of these litters (*b*) [18]

Зазначені властивості *Q. rubra* зумовлюють інтенсивне накопичення нерозкладеної фітомаси на поверхні ґрунту і формування потужного шару опаду (*L*), який може досягати 10—15 см. Важливо, що збільшення потужності цього шару додатково сповільнює деструкцію свіжих порцій опаду, оскільки їх інокуляція ґрунтовою мікрофлорою є обмеженою.

Ми розглянули як приклад *Q. rubra* не випадково. В Україні збереглися значні площі його монокультури, які характеризуються вкрай низьким флористичним та фауністичним різноманіттям і є більше угіддями, ніж лісовими екосистемами. Ми пропонуємо розглянути ці насадження не як джерело деревини сумнівної якості, а як готові агролісівничі комплекси для біологічної секвестрації Карбону.

На прикладі *Q. rubra* показано, що створення штучних насаджень (агролісів) з інтродукованих деревних порід дає змогу сповільнювати темпи деструкції органічної речовини у біогеоценозі, забезпечуючи комплексний вплив на всю систему субстрат-трофічних перетворень: 1) інтродуковані види часто є стійкими до місцевих хвороб та шкідників, тому повністю реалізують свій біотичний потенціал, 2) листя інтродуцента *Q. rubra* мало споживається консументами (фітофагами), відповідно, сповільнюється перетворення біомаси на копромасу та рідкі продукти метаболізму, 3) опад *Q. rubra* (некромаса) мало заселяється сапротрофами, тому його механічне і трофічне подрібнення відбувається повільніше, ніж опаду автохтонних видів, 4) детрит, сформований з опаду *Q. rubra*, має низьку трофічну цінність для детритофагів, 5) низька здатність сорбувати та утримувати вологу і низький вміст водорозчинних сполук істотно сповільнюють розклад опаду мікроорганізмами.

Висновки

У системі субстрат-трофічних перетворень органічної речовини виділено шість основних блоків: біомаса, некромаса, копромаса, детрит, органічна речовина ґрунту, рідкі продукти метаболізму, кожен з яких має характерний час, або MRT, — від декількох годин до тисячі років.

Повільні темпи деструкції опаду окремих інтродукованих деревних рослин пов’язані з його низькою трофічною цінністю, водоутримувальною здатністю та вмістом розчинених органічних речовин, доступних для мінералізації *in situ*.

Обґрунтовано доцільність використання інтродукованих деревних рослин для біологічної секвестрації Карбону, серед яких пріоритет віддано *Quercus rubra* як одному із найпоширеніших в Україні інтродуцентів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. *Бедернічек Т.Ю.* Лабільна органічна речовина ґрунту: теорія, методологія, індикаторна роль / Т.Ю. Бедернічек, З.Г. Гамкало. — К.: Кондор, 2014. — 180 с.
2. *Головко Э.А.* Микроорганизмы в аллелопатии высших растений / Э.А. Головко. — К.: Наук. думка, 1984. — 200 с.
3. *Заварзин Г.А.* Лекции по природоведческой биологии / Г.А. Заварзин. — М.: Наука, 2004. — 348 с.
4. *Заіменко Н.В.* Наукові принципи структурно-функціонального конструювання штучних біогеоценозів у системі ґрунт—рослина—ґрунт / Н.В. Заіменко. — К.: Наук. думка, 2008. — 304 с.
5. *Керженцев А.С.* Функциональная экология / А.С. Керженцев. — М.: Наука, 2006. — 259 с.
6. *Комаров А.С.* Моделирование динамики органического вещества в хвойно-широколиственных лесах в разных типах местообитаний при пожарах (вычислительный эксперимент) / А.С. Комаров, Т.С. Кубасова // Известия РАН, сер. биологическая. — 2007. — № 4. — С. 490—500.
7. *Кузнецов А.М.* Активный пул органического вещества почвы при разных способах землепользования и системах удобрения: Автореф. дис. на соискание учен. степени канд. биол. наук.: спец. 06.01.04 — «Агрохимия» / А.М. Кузнецов. — М., 2008. — 22 с.
8. *Морозов А.И.* О почве и почвоведении (взгляд со стороны) / А.И. Морозов. — М.: ГЕОС, 2007. — 286 с.
9. *Орлов О.* Енергоємність гумусу як критерій гумусового стану ґрунтів / О. Орлов // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біологічна. — 2002. — № 31. — С. 111—115.
10. *Партика Т.В.* Едафічний мікроклімат та його вплив на дихання ґрунтів у мезогемеробних екосистемах басейну Верхнього Дністра / Т.В. Партика, Т.Ю. Бедернічек, З.Г. Гамкало // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. географічна. — 2014. — № 45. — С. 106—112.
11. *Пахомов О.Є.* Функціональне різноманіття ґрунтової мезофауни / О.Є Пахомов, О.М. Кунах. — Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2005. — 324 с.
12. *Пулы* и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С. А. Благодатский и др. — М.: Наука, 2007. — 315 с.
13. *Скринінг* фітовірусів компонентів лісових екосистем та прилеглих територій / А.Л. Бойко, Н.О. Опришко, О.А. Бойко, Г.А. Тарасенко, А.В. Орловський, Г.М. Орловська, В.В. Мороз // Агроекол. журн. — 2015. — № 4. — С. 102—108.
14. *Чорнобай Ю.М.* Трансформація рослинного детриту в природних екосистемах / Ю.М. Чорнобай. — Львів: Вида-во ДПМ НАН України, 2000. — 352 с.
15. *Biochar* Application to Soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions / F. Verheijen, S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde, I. Diafas // Office for the Official Publications of the European Communities. — Luxembourg, 2009. — 149 p.
16. *Calibration* of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3) using measurable soil organic carbon pools / J.O. Skjemstadt, L.R. Spouncer, B. Cowie, R.S. Swift // Australian Journal of Soil Research. — 2004. — Vol. 42(1). — P. 79—88.
17. *Chmura D.* Impact of alien tree species *Quercus rubra* L. on understorey environment and flora: a study of the Silesian upland (Southern Poland) / D. Chmura // Polish Journal of Ecology. — 2013. — N 61 (3). — P. 431—442.
18. *Dobrylovska D.* Litter decomposition of red oak, larch and lime tree and its effect on selected soil characteristics / D. Dobrylovska // Journal of Forest Science. — 2001. — N 11. — P. 477—485.
19. *Frost C.J.* Insect herbivores and their frass affect *Quercus rubra* leaf quality and initial stages of subsequent litter decomposition / C.J. Frost, M.D. Hunter // Oikos. — 2008. — N 117 (1). — P. 13—22.
20. *Hamkalo Z.* Total, cold and hot water extractable organic carbon in soil profile: impact of land-use change / Z. Hamkalo, T. Bedernichek // Zemdirbyste-Agriculture. — 2014. — N 101 (2). — P. 125—132.
21. *Hansen R.A.* Red oak litter promotes a microarthropod functional group that accelerates its decomposition / R.A. Hansen // Plant and soil. — 1999. — N 209(1). — P. 37—45.
22. *Holdsworth A.R.* Litter decomposition in earthworm-invaded northern hardwood forests: role of invasion degree and litter chemistry / A.R. Holdsworth, L.E. Frelich, P.B. Reich // Ecoscience. — 2015. — N 15 (4). — P. 536—544
23. *Jonczak J.* Decomposition of four tree species leaf litters in headwater riparian forest / J. Jonczak, A. Parzych, Z. Sobisz // Baltic Forestry. — 2015. — N 21(1). — P. 133—143.
24. *Kim C.* Canopy cover effects on mass loss, and nitrogen and phosphorus dynamics from decomposing litter in oak and pine stands in northern Lower Michigan / C. Kim, T.L. Sharik, M.F. Jurgensen // Forest Ecology and Management. — 1996. — N 80 (1). — P. 13—20.
25. *Pouyat R.V.* Controls on mass loss and nitrogen dynamics of oak leaf litter along an urban-rural land-use gradient / R.V. Pouyat, M.M. Carreiro // Oecologia. — 2003. — N 135 (2). — P. 288—298.
26. *Quality* of water-extractable organic carbon in forest soil: impacts of clear-felling / T. Bedernichek, Z. Hamkalo, O. Dzjuba, B. Ivanytska, T. Partyka // Proceedings of the 5th International Symposium on Soil Organic Matter. — 2015. — P. 556—557.
27. *Riepšas E.* Invasiveness and ecological effects of red oak (*Quercus rubra* L.) in Lithuanian forests / E. Riepšas, L. Straigytė // Baltic Forestry. — 2008. — N 14(2). — P. 122—130.

28. *Straigyte L.* Effect of climate variability on *Quercus rubra* phenotype and spread in Lithuanian forests / L. Straigyte, R. Zalkauskas // Dendrobiology. — 2012. — N 67. — P. 79—85.
29. *Zaimenko N.* Total and watersoluble organic matter content in soil under various methods of forestry / N. Zaimenko, O. Dziuba, T. Bedernichek // Інтродукція рослин. — 2014. — N 2. — P. 87—94.

Рекомендувала Н.В. Заіменко
Надійшла 28.12.2018

REFERENCES

1. *Bedernichek, T. and Hamkalo, Z.* (2014), Labile soil organic matter: theory, methodology and indicative role. Kyiv: Condor,180 p. (in Ukrainian)
2. *Golovko, E.* (1984), Microorganisms in allelopathy of higher plants. Kyiv: Naukova dumka, 200 p. (in Russian)
3. *Zavarzin, G.* (2004), Lectures on environmental microbiology. Moscow: Nauka, 348 p. (in Russian)
4. *Zaimenko, N.* (2008), Scientific principles of structural and functional design of artificial biogeocenosis in the system soil-plant-soil. Kyiv: Naukova Dumka, 304 p. (in Ukrainian)
5. *Kerzhentsev, A.* (2006), Functional Ecology. Moscow: Nauka, 259 p. (in Russian)
6. *Komarov, A. and Kubasova, T.* (2007), Modeling organic matter dynamics in conifer-broadleaf forests in different site types upon fires: a computational experiment. Biology Bulletin, vol. 34(4), pp. 490—500. (in Russian)
7. *Kuznetsov, A.* (2008), Active pool of soil organic matter under different types of land use and fertilization regimes. Ph.D. thesis, Lomonosov Moscow State University, 22 p. (in Russian)
8. *Morozov, A.* (2007), On soil and soil science: a look from the outside. Moscow: GEOS, 286 p. (in Russian)
9. *Orlov, O.* (2002), Capacity of the energy of the humus matter as a criterion humus condition of soils. Visnyk of Lviv University. Biology Series, N 31, pp.111—115. *(in Ukrainian)*
10. *Partyka, T., Bedernichek, T. and Hamkalo, Z.* (2014), Edaphic microclimate and its influence on soil respiration of mezohemerobic ecosystem in the Upper Dniester basin. Visnyk of Lviv University. Biology series, N 45, pp.106—112. (in Ukrainian)
11. *Pakhomov, O. and Kunach, O.* (2005), Functional diversity of the soil mesofauna in the steppe flooded forests under artificial environment contamination. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk national university press, 324 p. (in Ukrainian)
12. *Kudeyarov, V., Zavarzin, G., Blagodatskii, S. et al.* (2007), Carbon pools and fluxes in terrestrial ecosystems of Russia. Moscow: Nauka, 315 p. (in Russian)
13. *Boyko, A., Opryshko, N., Boyko, O., Tarasenko, G., Orlovskiy, A., Orlovskaya, G. and Moroz, V.* (2015), Screening of phytoviruses in forest ecosystems and adjacent areas. Agroecological Journal, N 4, pp. 102—108. (in Ukrainian)
14. *Chornobay, Yu.* (2000), Transformation of plant detritus in natural ecosystems. Lviv: State museum of natural history press, 352 p. (in Ukrainian)
15. *Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A., van der Velde, M. and Diafas, I.* (2009), Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: Office for the official publications of the European Communities, 149 p.
16. *Skjemstadt, J., Spouncer, L., Cowie, B. and Swift, S.* (2004), Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3) using measurable soil organic carbon pools. Australian Journal of Soil Research, Vol. 42(1), pp. 79—88.
17. *Chmura, D.* (2013), Impact of alien tree species *Quercus rubra* L. on understorey environment and flora: a study of the Silesian upland (Southern Poland). Polish Journal of Ecology, N 61(3), pp. 431—442.
18. *Dobrylovska, D.* (2001), Litter decomposition of red oak, larch and lime tree and its effect on selected soil characteristics. Journal of Forest Science, 11, pp. 477—485.
19. *Frost, C. and Hunter, M.* (2008), Insect herbivores and their frass affect Quercus rubra leaf quality and initial stages of subsequent litter decomposition. Oikos, N 117 (1), pp. 13—22.
20. *Hamkalo, Z. and Bedernichek, T.* (2014), Total, cold and hot water extractable organic carbon in soil profile: impact of land-use change. Zemdirbyste-Agriculture, N 101(2), pp. 125—132.
21. *Hansen, R.* (1999), Red oak litter promotes a microarthropod functional group that accelerates its decomposition. Plant and Soil, N 209(1), pp. 37—45.
22. *Holdsworth, A. and Freilich, A.* (2015), Litter decomposition in earthworm-invaded northern hardwood forests: role of invasion degree and litter chemistry. Ecoscience, N 15(4), pp. 536—544.
23. *Jonczak, J., Parzych, A and Sobisz, Z.* (2015), Decomposition of four tree species leaf litters in headwater riparian forest. Baltic Forestry, N 21(1), pp. 133—143.
24. *Kim, C., Sharik, T. and Jurgensen, M.* (1996), Canopy cover effects on mass loss, and nitrogen and phosphorus dynamics from decomposing litter in oak and pine stands in northern Lower Michigan. Forest Ecology and Management, N 80(1), pp. 13—20.
25. *Pouyat, R. and Carreiro, M.* (2003), Controls on mass loss and nitrogen dynamics of oak leaf litter along an urban-rural land-use gradient. Oecologia, N 135(2), pp. 288—298.

26. *Bedernichek, T., Hamkalo, Z., Dzjuba, O., Ivanytska, B. and Partyka, T.* (2015), Quality of water-extractable organic carbon in forest soil: impacts of clear-felling. In: 5th International Symposium on Soil Organic Matter. Göttingen, pp. 556—557.
27. *Riepšas, E. and Straigytė, L.* (2008), Invasiveness and Ecological Effects of Red Oak (*Quercus rubra* L.) in Lithuanian forests. Baltic Forestry, N 14(2), pp. 122—130.
28. *Straigyte, L. and Zalkauskas, R.* (2012), Effect of climate variability on *Quercus rubra* phenotype and spread in Lithuanian forests. Dendrobiology, N 67, pp. 79—85.
29. *Zaimenko, N., Dzjuba, O. and Bedernichek, T.* (2014), Total and watersoluble organic matter content in soil under various methods of forestry. Plant Introduction, N 2, pp. 87—94.

Recommended by N.V. Zaimenko
Received 28.12.2018

Т.Ю. Бедерничек

Национальный ботанический сад
имени Н.Н. Гришко НАН Украины,
Украина, г. Киев

БИОЛОГИЧЕСКАЯ СЕКВЕСТРАЦИЯ УГЛЕРОДА: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ *QUERCUS RUBRA* L.)

Одной из актуальных задач современной биогеохимии является уменьшение концентрации диоксида углерода в приземных слоях атмосферы. Наиболее доступным способом, позволяющим эффективно извлекать из тропосферы диоксид углерода, является биологическая секвестрация углерода. Традиционно повышения эффективности секвестрации достигают увеличением продуктивности фитоценоза. Рассмотрен обратный подход — достижение этой же цели в результате уменьшения эффективности катаболического блока наземных экосистем. Управление скоростью деструкции фитодетрита в лесах и агролесах рекомендовано осуществлять путем нарушения нормального функционирования одного или нескольких уровней в детритных трофических цепях и сетях. Предложена схема трофических преобразований органического вещества в биогеоценозе с выделением шести основных блоков, существенно отличающихся по характерному времени (mean residence time): биомасса, некромасса, копромасса, детрит, органическое вещество почвы, жидкие продукты жизнедеятельности. На примере опада дуба красного (*Quercus rubra* L.) проанализированы причины значительно более медленного разложения фитомассы, некромассы и детрита по сравнению с автохтонными видами в умеренном климатическом поясе (Восточная Европа). Обоснована целесообразность использования интродуцированных древесных растений для замедления деструкции органического вещества в биогеоценозе.

Ключевые слова: резервуар углерода, детрит, органическое вещество почвы, фитомасса, катаболизм, *Quercus rubra*, интродуцированные древесные растения.

T. Bedernichek

M.M. Gryshko National Botanical Garden,
National Academy of Sciences of Ukraine,
Ukraine, Kyiv

BIOLOGICAL CARBON SEQUESTRATION: PERSPECTIVES FOR APPLICATION OF INTRODUCED TREE SPECIES (CASE STUDY OF *QUERCUS RUBRA* L.)

One of the most important tasks of modern biogeochemistry is to decrease the concentration of carbon dioxide in troposphere. Biological carbon sequestration is widely used for this purpose as a simple and effective method; and sequestration efficiency is often described in terms of biological productivity. Hence, the most typical way to increase the rates of carbon sequestration is to increase the productivity of plant communities. In this study we suggest the opposite approach — to slow down decomposition of plant litter and detritus in forest ecosystems. For this purpose we suggest to disturb one or several segments of trophic chains and webs. Six-block scheme of trophic transformations of organic matter was developed: which included: biomass, necromass, copromass (feces), liquid waste products, detritus and soil organic matter. These blocks significantly differ from each other in mean residence time of organic matter and thus can be used for modeling of organic matter dynamics in terrestrial ecosystems. Litter of *Quercus rubra* L., as one of the most widespread introduced tree species, was used for case study. Decomposition rates of red oak and native species in temperate zone of East Europe were compared. Application of introduced tree species for biological carbon sequestration was shown to be reasonable and perspective for future studies.

Key words: carbon reservoir, detritus, soil organic matter, phytomass, catabolism, *Quercus rubra*, introduced tree species.